第39卷 第1期
2022年1月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 39 No. 1
Jan. 2022

保护性耕作对陇中旱作麦田蓄水保墒效果和产量的影响

祁小平， 李 广， 袁建钰， 常海刚

（甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：为探究保护性耕作对陇中黄土高原旱作麦田蓄水保墒效果和产量形成的影响。在连续5 a田间试验的基础上，分析了陇中黄土高原旱作麦田从2019年8月至2020年8月一个耕作周期内，不同耕作措施（传统耕作T、秸秆覆盖TS，免耕NT和免耕秸秆覆盖NTS）对麦田休闲期蓄墒率、水分利用效率、春小麦干物质积累与转运、产量及农艺性状的影响。结果表明：(1) 与处理T相比，NTS处理提高了耕层土壤容重和含水量，提高了旱作麦田播种和收获期土壤蓄水量，使水分利用效率提高了48.18%、休闲期蓄墒率提高了5.70%；(2) NTS处理显著提高了春小麦叶面积指数、延缓了叶片的衰老，相比于TS和NT处理，NTS处理下花后干物质积累量分别提高了67.38%和32.14%，花后干物质贡献率分别提高了12.47%和6.61%；(3) NTS处理优化了产量构成因素、显著提高了春小麦产量，使产量达到了3243.30 $kg \cdot hm^{-2}$，比传统耕作(T)产量提高了49.32%；NTS处理改善了春小麦群体结构，显著提高了春小麦根系干重、株高和生物量，降低了根冠比，相关性分析表明水分利用效率、叶面积指数、根系干重的提高是促进小麦增产的重要原因。在本试验条件下，免耕秸秆覆盖是实现陇中黄土高原旱作麦田蓄水保墒及节水增产的最优耕作措施、值得在该地区推广应用。

关键词：陇中黄土高原；旱作麦田；保护性耕作；春小麦；水分利用效率；产量；干物质积累与转运

土地利用方式及耕作制度的改变对农田生态系统有直接性影响，合理的耕作方式能够协调农田生态系统中“水、肥、气、热”间的关系，优化土壤结构，促进作物的生长和产量的形成[1-2]。陇中黄土高原半干旱区是甘肃省重要的小麦(*Triticum aestivum*)生产区，但该地区地处我国西北内陆，降雨量少、蒸发量大，年均降雨量在300~500 mm之间，降雨量年际波动剧烈且季节分布不均，常常十年九旱，是黄土高原旱地农业的典型代表[2]。另外，长期以来传统的耕作方式降低了土壤保肥蓄水能力、加剧了水土流失，使农田生态环境日益恶化，作物产量降低，这严重制约着该地区农业经济的发展[3-5]。因此，寻求一种既可以改善农田生态环境又能促进小麦节水增产的耕作措施是该区实现农业可持续发展的当务之急。有研究表明，以免耕为代表的保护性耕作措施是一项节水增效的重要措施，在改善耕地土壤质量和提高土壤蓄水保肥能力、以及控制水土流失方面具有显著的生态效益，是缓解我国干旱及半干旱地区农业生产中水资源不足，提高作物产量和水分利用效率实现农业可持续发展的有效途径之一[1,6]。因此，在陇中黄土高原半干旱区特殊的地理和气候条件下，探究保护性耕作措施对改善农田生态环境，提高作物产量和水分利用效率，实现作物节水增产增效方面具有重要意义。

目前，保护性耕作已成为半干旱区农业可持续发展的重要技术之一，近年来国内外已有大量研究和应用[7-8]，与传统耕作相比免耕具有良好的蓄水保墒作用，可显著提高冬小麦贮水量和水分利用效率；黄明等[9]研究表明，免耕覆盖和深松覆盖较传统耕作方式能够培肥土壤，提高小麦花后干物质积累，促进产量的形成；但也有研究表明，保护性耕作对作物产量影响不明显，甚至出现减产的现

收稿日期：2021-09-06； **修订日期：**2021-10-13
基金项目：甘肃省财政专项(GSCZZ-20160909)；甘肃省重点人才项目(LRYCZ-2020-1)；甘肃省重点研究发展计划项目(20YF8NA135)
作者简介：祁小平(1996-)，男，硕士研究生，研究方向为农地土壤环境化学. E-mail: 494507619@qq.com
通讯作者：李广. E-mail: lig@gsau.edu.cn

象[10-12]。目前关于保护性耕作对产量影响的研究大都从土壤养分及水分条件出发，但针对作物产量形成的关键因素，即作物生长特性、水分利用与产量之间关系的研究鲜有报道，且在陇中黄土高原半干旱区特殊的地理和气候条件下，保护性耕作对陇中黄土高原半干旱区春小麦水分利用和产量形成的影响尚不明确。

因此，本研究依托陇中黄土高原旱农综合试验站，通过不同耕作措施对土壤容重和含水量、春小麦生育期耗水量与水分利用效率的影响，综合分析春小麦农艺性状、干物质积累和产量形成的关系。阐明保护性耕作对春小麦水分利用效率和产量的影响，以期为陇中黄土高原半干旱区保护性耕作的推广应用以及农业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在甘肃省定西市安定区安家坡村甘肃农业大学旱农综合试验站（35°64′N，104°64′E）进行[13]。该地区属于典型的半干旱雨养农作区，平均海拔2000 m，年均气温为6.4 ℃、年均蒸发量1531 mm、无霜期约140 d。年均降雨量409.5 mm，生育期平均降雨量302.9 mm[13]；通过分析该地区多年月均降雨情况可知（图1），降雨量季节分布不均匀与作物生长关键需水时期不一致，全年降雨的65%~70%集中在6—9月，在作物播种期和幼苗期的3—5月降雨量仅占全年降雨的18%~21%，整个冬季和春季干旱少雨、存在严重的季节性干旱。2020年降雨量（388.4 mm）比多年平均降雨量（409.5 mm）低5.15%，为平水年型。试验区土壤质地为黄绵土，土壤养分含量、地貌特征在陇中黄土高原旱作区有一定代表性[13]。试验前耕层（0~20 cm）土壤理化性质如表1所示。

1.2 试验设计

样地布设于2016年，已经持续监测近5 a，本研究以2020年数据为基础进行分析。选择"甘春27号"春小麦为供试品种，该品种抗旱抗倒性强、适应性广，已在甘肃陇中半干旱地区有较大的推广面积。春小麦于2020年3月15日播种、8月5日收获。试验以传统耕作（T）为对照，再布设3种保护性耕作：传统耕作+秸秆覆盖（TS）；免耕（NT）；免耕+秸秆覆盖（NTS）共4个处理。每个处理重复3次共计12块样地，样地面积为24 m^2 (6 m×4 m)，每块样地播种量为150 kg·hm^{-2}，为避免边际效应各样地间设置1 m的隔离带。经走访调查当地农户春小麦种植施肥习惯，确定本试验施肥水平为：225 kg·hm^{-2}尿素

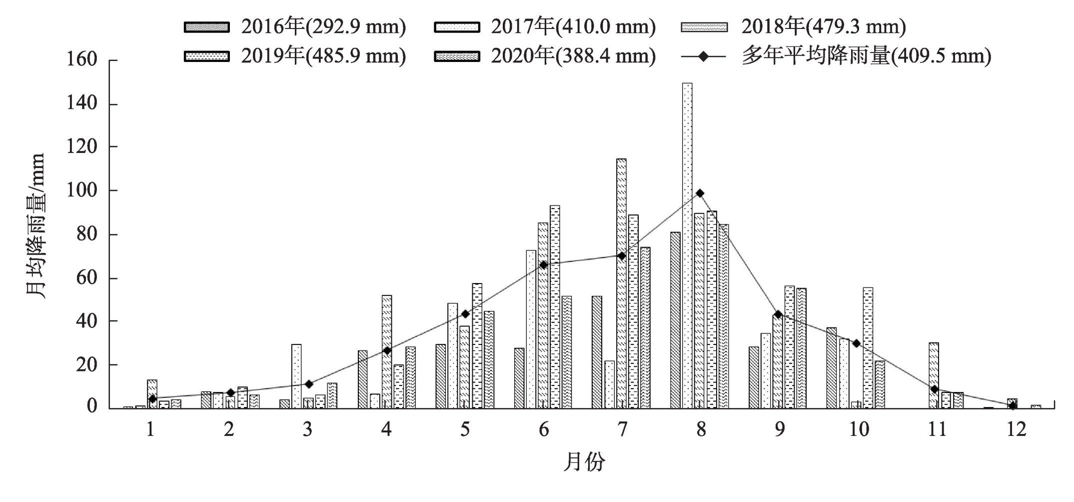


图1 2016—2020年试验区月均降雨量

Fig. 1 Average monthly rainfall in the test area from 2016 to 2020

表1 试验前供试土壤理化性质

Tab. 1 Physical and chemical properties of the tested soil before the test

有机碳/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(g·kg^{-1})	容重/(g·cm^{-3})
6.30	1.23	0.66	10.48	1.89	1.26

（含N 46.2%）和150 kg·hm^{-2}过磷酸钙（16% P_2O_5），采取70%底施＋30%拔节期追施的施肥模式。依据课题组在该地区的灌水量试验[13]，在春小麦拔节期（2020年4月22日）补灌150 mm灌水量，以保证春小麦生长过程中对水分的需求。灌溉水源为水窖里收集的自然降水，利用塑料软管将水引入试验小区，用精度0.001 m^{3}的水表计算具体灌溉用水量。其他田间管护措施与当地常规耕作一致，具体耕作方法[1]见表2。

1.3 样品采集及测定方法

1.3.1 春小麦干物质积累与转运　春小麦开花期和成熟期，在各试验小区随机采集15株具有代表性的植株地上部分样品带回实验室，将其分为叶片、茎秆和穗分别装入信封中置于恒温烘箱在105 ℃下杀青0.5 h，然后在80 ℃下烘至恒重[13]，分别测定植株样品各部分干物质量，计算营养器官干物质积累与转运量，具体计算公式如下[14]：

（1）花前干物质转运量（kg·hm^{-2}）=开花期营养器官干重−成熟期营养器官干重

（2）花前干物质转运率（%）=花前干物质转运量/开花期营养器官干物质量×100

（3）花前干物质贡献率（%）=花前干物质转运量/成熟期籽粒干物质量×100

（4）花后干物质积累量（kg·hm^{-2}）=成熟期营养器官干重−花前干物质转运量

（5）花前干物质贡献率（%）=花后干物质积累量/成熟期籽粒干重×100

（6）籽粒收获指数（%）=成熟期籽粒干重/成熟期植株生物量×100

1.3.2 春小麦生育期耗水量与水分利用效率测定　在春小麦播种前和成熟期用环刀法测定土壤剖面（0~20 cm，20~40 cm，40~60 cm，60~80 cm，80~100 cm）土壤容重，用烘干法测定土壤含水量，每个处理做3次重复，计算春小麦生育期贮水量与水分利用效率，具体计算公式如下[6]：

（1）土壤含水量（%）=（鲜土干重−烘干后干土干重）/烘干后干土干重×100

（2）土壤蓄水量 W(mm)=$\sum(A_i \times B_i \times C_i)$，式中：$i$为土层；$A_i$为土壤含水量（%）；$B_i$为土层土壤容重(g·cm^{-3})；$C_i$为土层厚度(cm)。

（3）土壤蓄水量变化量ΔW（mm）=播种前0~100 cm土层贮水量−收获后0~100 cm土层贮水量。式中：0~100 cm土层贮水量为各土层的加权平均值，权重为土层厚度所占比例。

（4）根据田间水分平衡方程计算总耗水量（ET）：ET（mm）=P+I−ΔW+G−R，式中：P（mm）是作物生育期总降水量；I（mm）是作物生长期间的灌水量；ΔW（mm）为作物生育期土壤贮水量变化；G（mm）为作物利用地下水量；R（mm）为径流量。因试验地为旱地，小麦全生育期降水少，试验地较为平坦，未考虑地表径流量渗漏等情况；又因试验地处于陇中丘陵区，地下水位低，深层土壤水分的影响可忽略不计。因此，ET（mm）=P+I − ΔW

（5）水分利用效率 WUE(kg·hm^{-2}·mm^{-1})=Y/ET，式中：Y为作物籽粒产量（kg·hm^{-2}）；ET为春小麦生育期耗水量（mm）。

（6）休闲期土壤蓄墒率（%）=(W_2 − W_1)/P，式中：W_2为休闲期末期土壤蓄水量（mm）；W_1为休闲期初期土壤蓄水量（mm）；P为休闲期总降水量（mm）。本研究中休闲期为2019年8月至2020年3月。

1.3.3 农艺性状测定方法　在春小麦灌浆期，参照Böhm[15]方法用直径为10 cm的根钻对所有处理的春小麦进行根系取样，10 cm为1个层次深度到100 cm。每个处理3次重复。用0.25 mm筛子洗净根系，去除杂质，在85 ℃烘干至恒重，测定根干重。并通过公式：根冠比=地下生物量/地上生物量，计算根冠比[16]。

在春小麦拔节期、开花期、灌浆期和成熟期各

表2　不同耕作处理描述

Tab. 2　Description of different tillage treatments

处理	代码	耕作方法
传统耕作	T	结合当地的耕作经验在种植前“三耕两耱”
免耕	NT	全年不翻地，播种时用免耕播种机一次性完成施肥和播种
秸秆覆盖	TS	耕作方式同T，在播种后将前作秸秆铡成10~15 cm，均匀覆盖在原小区，秸秆覆盖量4000 kg·hm^2
免耕秸秆覆盖	NTS	耕作方式同NT，在播种后将前作秸秆铡成10~15 cm，均匀覆盖在原小区，秸秆覆盖量4000 kg·hm^2

注：试验中采用的秸秆覆盖形式为生育期覆盖。

试验小区分别取15株具有代表性的小麦植株,用面积仪(LI-3000)测定叶面积,并通过公式:叶面积指数(*LAI*)=叶片总面积/土地面积,计算叶面积指数[14]。

1.3.4　籽粒产量及产量构成因素　春小麦成熟后在各试验小区中间区域随机选取3个1 m²样方(避免边际效应),调查单位面积有效穗数、每穗粒数(随机取15穗);收割样方内春小麦地上部分装入网袋自然风干,脱粒后称取籽粒重量,通过换算得到春小麦公顷产量和公顷有效穗数,并取500粒称重,换算成千粒重[13]。

1.4　数据处理

使用SPSS 24.0软件进行数据统计分析,Sigmaplot 12.5软件作图。运用单因素方差分析(One-way AVONA)检验春小麦各处理间水分利用效率、干物质积累与转运、农艺性状及产量间的差异显著性(α=0.05),用Pearson相关性分析法描述春小麦农业性状与产量间的相关关系。

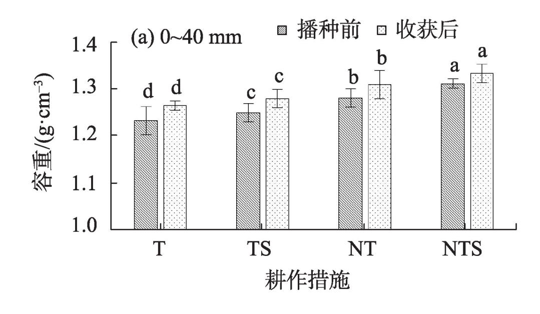
2　结果与分析

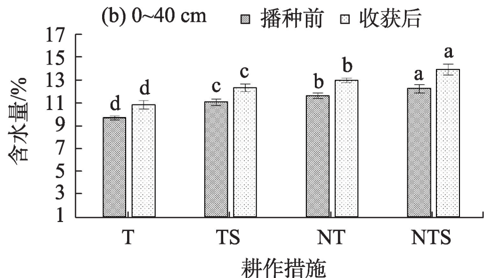
2.1　不同耕作措施对旱作麦田蓄水保墒效果的影响

不同耕作措施下土壤容重和含水量的变化如图2所示,在春小麦播种前和收获后土壤耕层(0~40 cm)容重和含水量均表现为:NTS>NT>TS>T,与播种前相比收获后T和NTS处理下容重提高了2.67%和1.64%,含水量提高了2.54%和3.05%;NTS处理显著提高了播种前和收获后土壤蓄水量、水分利用效率及休闲期土壤蓄墒率(表3),与处理T相比,NTS处理下播种前和收获后土壤蓄水量平均提高了27.35 mm和21.23 mm,水分利用效率提高了48.18%、休闲期蓄墒率提高了5.70%;不同耕作措施处理下生育期总耗水量在412.40~418.52 mm之间,表现为:NTS>NT>TS>T,但NTS、NT与TS处理间差异不显著。

2.2　不同耕作措施对春小麦叶面积指数及干物质量积累与转运的影响

2.2.1　不同耕作措施对春小麦生育期叶面积指数的影响　由图3所示,不同生育期各处理春小麦叶面积指数存在显著差异(P<0.05),且均在NTS处理下达到最大值。从拔节到成熟期各处理下春小麦叶面积指数均呈先增后减的趋势,传统耕作处理(T和TS)在抽穗期达到了峰值,而免耕处理(NT和NTS)在开花期达到最大值,从开花期到成熟期各处理下春小麦叶面积指数降幅在44.74%~39.20%之间,具体表现为T(44.74%)>TS(43.16%)>NT(42.08%)>





注:T表示传统耕作,TS表示秸秆覆盖,NT表示免耕,NTS表示免耕秸秆覆盖;
不同的小写字母表示不同耕作措施间差异显著(P<0.05)。下同。

图2　不同耕作措施对土壤容重和含水量的影响

Fig. 2　Influence of different tillage measures on soil bulk density and water content

表3　不同耕作措施对春小麦水分利用效率及耗水量的影响

Tab. 3　Effects of different tillage measures on water use efficiency and water consumption of spring wheat

处理	0~100 cm 土层蓄水量		生育期总耗水量/mm	水分利用效率/(kg·hm⁻²·mm⁻¹)	土壤蓄墒率/%
	播种前/mm	收获后/mm			
T	245.23±24.51d	263.53±13.52d	412.40±13.91b	5.23±0.12d	5.98±0.28d
TS	257.02±34.99c	270.01±17.63c	417.72±14.23a	5.73±0.14c	7.20±0.56c
NT	262.65±28.25b	276.93±18.76b	416.43±24.12a	6.56±0.17b	9.58±0.66b
NTS	272.58±14.63a	284.76±20.32a	418.52±12.51a	7.75±0.24a	11.68±0.42a

注:T表示传统耕作,TS表示秸秆覆盖,NT表示免耕,NTS表示免耕秸秆覆盖;同列数据后不同的小写字母表示不同耕作处理间差异显著(P<0.05)。下同。

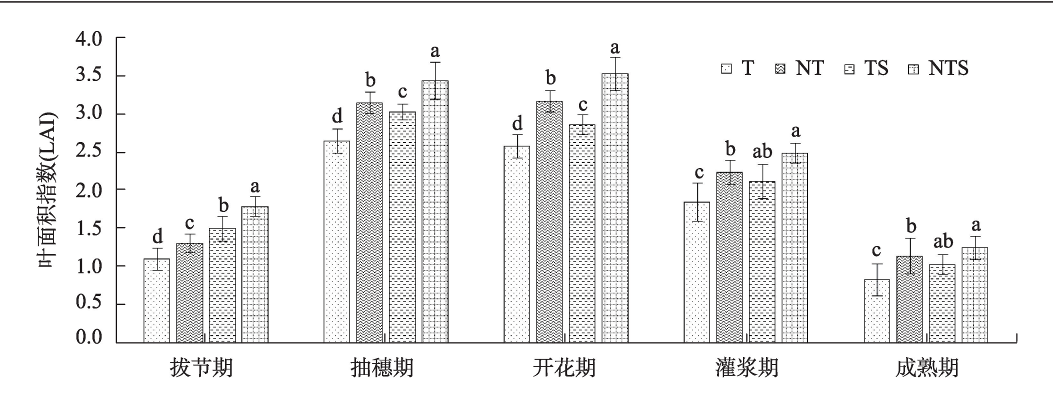


图3 不同耕作措施对春小麦生育期叶面积指数的影响

Fig. 3 Effect of different tillage treatments on the leaf area index during the growth period of spring wheat

NTS(39.20%)。说明免耕秸秆覆盖可显著提高春小麦叶面积,有效延缓了花后期小麦叶片的衰老。

2.2.2 不同耕作措施对春小麦干物质量积累与转运的影响 不同耕作处理显著影响春小麦干物质积累与转运情况(表4)。与传统耕作(T)相比,不同保护性耕作(TS、NT和NTS)处理下花后干物质积累量对籽粒的贡献率显著高于花前干物质转运的贡献率,说明花后干物质积累是小麦籽粒干物质形成的主要时期。NTS处理显著提高了春小麦花后干物质积累量与贡献率,且各处理间差异显著($P<0.05$),相比于TS和NT处理,NTS处理下花后干物质积累量分别提高了67.38%和32.14%,花后干物质贡献率分别提高了12.47%和6.61%;不同耕作处理下籽粒收获指数表现为NTS>NT>TS>T,但各处理间差异不显著。

2.3 不同耕作措施对春小麦产量及农艺性状的影响

2.3.1 不同耕作措施对春小麦产量及其构成因素的影响 不同耕作处理显著影响春小麦产量及其构成因素(表5),NTS处理显著提高了春小麦产量使产量达到了3243.30 kg·hm^{-2},比常规耕作(T)产量提高了49.32%。NTS处理也改善了春小麦群体结构、优化了产量构成因素。与处理T相比,NTS处理下春小麦千粒重、公顷有效穗数和穗粒数分别增加了15.25%、16.70%和11.46%。通过产量与其构成因素间做通径分析发现(表6),通径系数依次为:公顷有效穗数(0.397)>千粒重(0.392)>穗粒数(0.301),表明公顷有效穗数和千粒重对春小麦增产的贡献最大。

2.3.2 不同耕作措施对春小麦农艺性状的影响 不同耕作措施显著影响春小麦农艺性状(图4),NTS

表4 不同耕作措施对春小麦干物质积累与转运的影响

Tab. 4 Effects of different tillage measures on dry matter accumulation and transportation of spring wheat

处理	花前干物质			花后干物质		
	转运量/(kg·hm^{-2})	转运率/%	贡献率/%	积累量/(kg·hm^{-2})	贡献率/%	收获指数/%
T	1130.47±39.07a	33.64±1.31a	52.04±1.42a	1041.57±36.02d	47.95±2.42d	29.34±2.40b
TS	1129.84±28.42b	30.16±0.81b	47.17±2.97b	1265.30±85.02c	52.83±2.97c	30.88±2.40a
NT	1128.09±19.45c	25.98±0.72c	41.30±0.36c	1602.72±47.09b	58.69±1.32b	30.90±2.31a
NTS	1125.37±24.09d	22.38±0.71d	34.69±1.65d	2117.93±40.79a	65.30±1.65a	31.20±4.67a

表5 不同耕作措施对春小麦产量及其构成因素的影响

Tab. 5 Effects of different tillage measures on spring wheat yield and its components

处理	产量/(kg·hm^{-2})	千粒重	公顷有效穗数/10^4	穗粒数
T	2172.04±55.62d	40.42±0.69c	164.29±0.34c	30.33±0.33c
TS	2395.26±30.78c	42.86±0.19bc	175.39±0.57b	31.67±0.26b
NT	2730.81±45.93b	43.31±0.22b	172.42±0.66b	32.33±0.54a
NTS	3243.30±40.64a	44.93±0.26a	181.84±0.73a	32.67±0.36a

表6　春小麦产量及其产量构成因素的通径分析

Tab. 6　Path analysis of spring wheat yield and its yield composition

自变量	通径系数	间接通径系数			
		X1	X2	X3	合计
X1	0.392	–	0.298	0.263	0.561
X2	0.397	0.294	–	0.206	0.500
X3	0.301	0.342	0.272	–	0.614

注:X1表示千粒重,X2表示公顷有效穗数,X3表示穗粒数。

处理显著提高了春小麦根系干重、株高和生物量,显著降低了根冠比。与处理T相比,NTS处理下春小麦根系干重、株高和生物量分别增加了90.91%、22.17%和44.07%,根冠比降低了13.74%;由表7可知,水分利用效率(r=0.992)、叶面积指数(r=0.952)、根系干重(r=0.955)与产量及产量构成因素间存在极显著正相关(P<0.01),表明水分利用效率,叶面积指数,根系干重的提高是促进小麦增产的重要原因。

3　讨 论

3.1　不同耕作处理对春小麦土壤含水量及水分利用效率的影响

耕作是土壤物理响应的主要驱动因子,容重和含水量是反映土壤物理性质的基本因素。本试验研究表明,NTS处理显著提高了播种前和收获后耕层(0~40 cm)土壤容重和含水量,与其他各处理相比,NTS处理下播种前和收获后容重变化量最低而含水量变化量最高,这说明经过5 a的免耕处理土壤容重以达到较高,变化基本稳定不再持续增加。这与罗珠珠等[17]的研究结果一致,这是因为试验地土壤质地为黄绵土,土壤有机质含量低、黏性差,土壤多为粉粒结构、易侵蚀、保水保肥能力差。传统耕作下麦田耕层土壤较疏松、水分易蒸发。而NTS处理保留了根茬,增加了土壤有机质的含量,经过多年的免耕处理,有效降低了耕作对表层土壤的破

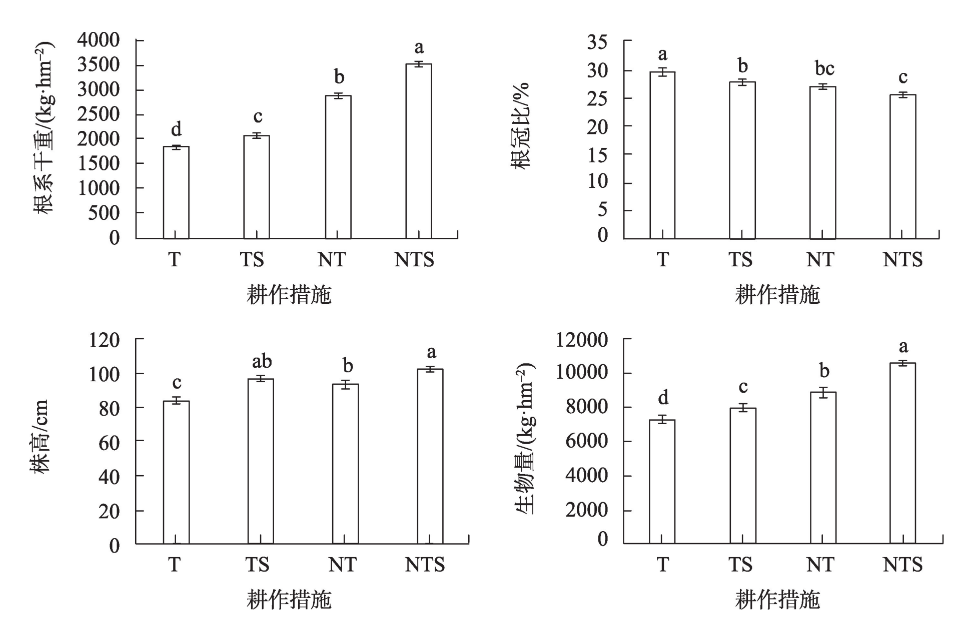


图4　不同耕作措施对春小麦农艺性状的影响

Fig. 4　Effects of different tillage measures on agronomic characteristics of spring wheat

表7　春小麦产量、水分利用效率与农艺性状间的相关性分析

Tab. 7　Correlation analysis between spring wheat yield, water use efficiency and agronomic traits

	根系干重	根冠比	株高	生物量	叶面积指数	水分利用效率
产量	0.955**	-8.48**	0.802**	0.942**	0.952**	0.992**
千粒重	0.937**	−0.806**	0.855**	0.875**	0.918**	0.934**
公顷有效穗数	0.908**	−08.32**	0.747**	0.922*	0.940**	0.963**
穗粒数	0.905**	−0.771**	0.820**	0.847**	0.855**	0.927**

注:**表示极显著相关(P<0.01)。

坏,促进了大的土壤团聚体的形成并且提高了土壤团聚体稳定性有效降低了水分的蒸发和下渗,起到了聚水保墒的作用,提高了土壤含水量、提升了土壤的蓄水容量[18-22]。

减少土壤水分蒸发,提高作物水分利用效率是旱作农业研究的重要内容[20]。本研究发现,NTS处理可以显著提高春小麦水分利用效率,这与前人研究结果一致[18,20-21]。这是因为陇中黄土高原半干旱区具有降雨量少、蒸发量大的特点。秸秆覆盖可有效降低表层土壤水分的蒸发,免耕能够有效改善土壤结构、促进土壤团聚体的形成,提高土壤蓄水能力[21];而免耕秸秆覆盖处理结合了二者的优点,具有良好的保水抑蒸作用,能够降低土壤水分的无效蒸发,满足春小麦生长关键时期对水分的需求,促进小麦的增产,进而提高春小麦水分利用效率达到保水增产的效果。此外,本研究中与传统耕作相比,TS、NT和NTS处理均不同程度的提高了春小麦生育期总耗水量,但各处理间差异不显著。这与冯福学等[23]的研究结果一致,这是因为随着小麦的生长,小麦冠层结构逐渐增大,秸秆覆盖抑制土壤水分蒸发的作用逐渐减弱,土壤水分的消耗以作物蒸腾为主[23]。而在免耕秸秆覆盖处理下小麦生长旺盛,叶面积指数增大,蒸腾耗水增多,导致成熟期各处理间土壤蓄水量差异减小,各处理间春小麦生育期耗水量差异不显著[23]。这也说明采用生育期秸秆覆盖的保护性耕作措施并不能充分利用土壤水分,达到显著的节水增效作用,在本试验条件下仅研究生育期秸秆覆盖对土壤蓄水保墒效果的影响存在一定的局限性,那么在休闲期实施秸秆覆盖是否更有利于提高蓄水保墒效果,还需要进一步研究揭示。

本研究还发现,NTS处理可显著提高休闲期土壤蓄墒率及及播种前和收获后土壤蓄水量,其中对播种前土壤蓄水量提高效果更显著。与丁晋利[6]和王志鑫[18]等的研究结果一致,这是因为传统耕作“三耕两耱”的耕作方式,造成休闲期土壤水分的大量蒸发,降低了耕作前土壤含水量[22];而免耕处理下,土壤未受到扰动并且保留了根茬,降低了地表径流和耕层土壤水分的无效蒸发,促进了休闲期土壤水分的积累,提高了休闲期土壤蓄墒率和耕作前土壤蓄水量[19]。因此,免耕秸秆覆盖处理具有显著的蓄水保墒作用,能够接纳并储存较多的雨水,满足春播时小麦生长的需要,达到“秋雨春用”的节水增产效果[11]。

3.2 不同耕作措施对春小麦叶面积指数及干物质量积累与转运的影响

干物质积累与转运是小麦产量形成的物质基础[24]。在本试验条件下,NTS处理显著提高了春小麦叶面积指数,有效延缓了花后叶面积指数降低的速率,提高了花后干物质的积累量和对籽粒的贡献率,提高了籽粒收获指数。王健波等[24]在晋南旱区的研究表明,免耕秸秆覆盖能显著提高小麦净光合速率,提高花后干物质积累能力,促进干物质向籽粒中的积累和分配,最终提高小麦产量。陈乐梅等[25]在新疆的研究也表明,免耕覆盖可以显著提高小麦灌浆期间籽粒中干物质的积累量,提高干物质在籽粒中的分配比例。这些结论与本研究结果一致。这是因为免耕秸秆覆盖处理显著提高了小麦生长过程中土壤含水量和水分利用效率,克服了水分对春小麦生长关键时期的限制促进了小麦的生长。提高了小麦叶面积指数和叶片中水分含量,进而促进了小麦叶片对光合产物的积累[14]。叶面积指数的提高也有效改善了春小麦冠层形态结构,提高了小麦叶片对光能的截获量,促进了小麦群体的光合作用,进而提高了春小麦花后期干物质的积累量[24]。另外,NTS处理增加了土壤中根茬、枯落物等有机物的还田量,提高了土壤有机质含量,使土壤结构及通气状况得到改善,为作物生长提供了充足的养分,进而促进小麦籽粒中养分的积累,提高籽粒干重[19]。

3.3 不同处理对春小麦产量和农艺性状的影响

提高作物产量是农业生产的重点,耕作措施可通过调节土壤环境对作物的生长和产量的形成产生重要影响[23]。本研究发现,与常规耕作(T)相比,NTS处理显著提高了春小麦产量,优化了产量构成因素,通过产量与其构成因素间的通径分析发现公顷有效穗数和千粒重对春小麦增产的贡献最大,是导致小麦产量提高的主要因素,这与韩宾[12]和王嘉男[14]等的研究结果一致。这是因为在春旱比较突出的陇中黄土高原半干旱雨养农作区,播种期水分胁迫是影响作物出苗和成活的关键因素[1],秸秆覆盖处理特别是NTS处理,在春小麦休闲期贮藏了大量水分,显著提高了春小麦播种期土壤含水量,保证了春小麦较高的成活率和出苗率并且确保了苗

期小麦的正常生长[1,14,26];NTS处理具有良好的蓄水保墒能力,良好的水肥环境促进了小麦的生长,使小麦根系在发生有效分蘖的基础上保证了较多的有效穗数,从而提高小麦公顷有效穗数。另外,NTS处理也显著提高了春小麦叶面积指数,促进光合产物在籽粒中的积累和转运,提高籽粒千粒重,从而促进了小麦产量的形成。

建立合理的群体结构是提高作物产量的有效途径,根系干重、根冠比、叶面积指数、株高及生物量是反映小麦群体对水肥利用、光合性能及干物质积累的重要指标,是影响作物产量形成的重要因素[27]。本试验结果表明NTS处理显著提高了春小麦根系干重、株高和生物量、显著降低了根冠比,与前人研究结果一致[16,28-30]。通过春小麦农艺性状和产量间的相关性分析发现水分利用效率、叶面积指数、根系干重与产量及产量构成因素间存在显著正相关(P<0.05),表明水分利用效率、叶面积指数、根系干重的提高是促进小麦增产的重要原因。这是因为NTS处理有效改善了耕层土壤结构,促进了根系的生长及深层分布,使根系能够充分吸收土壤水分和养分供地上部分利用,为产量的形成奠定了基础[21]。NTS处理提高了株高和生物量降低了根冠比,表明NTS处理有效改善了春小麦冠层结构,使地上部分获得了较大的干物质量分配比例,促使更多的光合同化物向籽粒和地上部分转移,从而实现作物产量的提高[16]。

4　结 论

本研究基于陇中黄土高原旱作麦田在保护性耕作下土壤蓄水保墒效果、春小麦干物质量积累与转运和产量的分析,得出以下结论:

(1) 免耕秸秆覆盖的耕作方式较传统耕作处理显著提高了土壤0~100 cm土壤蓄水量、水分利用效率及休闲期蓄墒率,起到了很好的蓄水保墒作用。

(2) 免耕秸秆覆盖处理显著提高了春小麦叶面积指数,延缓了小麦叶片的衰老,提高了花后干物质积累量和贡献率,为实现小麦高产奠定了基础

(3) 免耕秸秆覆盖处理不但优化了小麦产量构成因素,同时也改善了小麦群体农艺性状,其中水分利用效率、叶面积指数及根系干重的提高是实现小麦增产的重要原因。

因此,在本实验条件下,免耕秸秆覆盖是兼顾高产节水的最优耕作措施,对当地春小麦生产及保护性耕作在当地的推广应用具有一定的指导作用。

参考文献(References):

[1] 罗珠珠, 蔡立群, 李玲玲, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤养分和作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 171−176. [Luo Zhuzhu, Cai Liqun, Li Lingling, et al. Long-term effects of tillage system on soil nutrients and grain yields in rainfed area of Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 171−176.]

[2] 晋小军, 黄高宝. 陇中半干旱地区不同耕作措施对土壤水分及利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 111−114. [Jin Xiaojun, Huang Gaobao. Effects of different tillage methods on soil water and water use efficiency in semi-arid area of Gansu[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5): 111−114.]

[3] 张建军, 王勇, 唐小明, 等. 陇东黄土旱塬不同耕作方式及施肥处理对冬小麦产量和土壤肥力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 247−254. [Zhang Jianjun, Wang Yong, Tang Xiaoming, et al. The effects of different tillage methods and fertilizer treatments on yield of winter wheat and soil fertility in the Loess Plateau of east Gansu[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 247−254.]

[4] 李玲玲, 黄高宝, 秦舒浩, 等. 保护性耕作对绿洲灌区冬小麦产量形成的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(3): 514−520. [Li Lingling, Huang Gaobao, Qin Shuhao, et al. Effect of conservation tillage on dry matter accumulating and yield of winter wheat in oasis area[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(3): 514−520.]

[5] 潘雅文, 樊军, 郝明德, 等. 黄土塬区长期不同耕作、覆盖措施对表层土壤理化性状和玉米产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1558−1567. [Pan Yawen, Fan Jun, Hao Mingde, et al. Effects of long-term tillage and mulching methods on properties of surface soil and maize yield in tableland region of the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(6): 1558−1567.]

[6] 丁晋利, 魏红义, 杨永辉, 等. 保护性耕作对农田土壤水分和冬小麦产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2501−2508. [Ding Jinli, Wei Hongyi, Yang Yonghui, et al. Effects of conservation tillage on soil water condition and winter wheat yield in farmland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8): 2501−2508.]

[7] 赵小蓉, 赵燮京, 陈先藻. 保护性耕作对土壤水分和小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊1): 6−10. [Zhao Xiaorong, Zhao Xiejing, Chen Xianzao. Effects of conservation tillage on soil moisture and wheat yield[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Suppl.1): 6−10.]

[8] Unger P W. Straw mulch rate effects on soil water storage and sorghum yield[J]. Soil Science Society of America Journal, 1978, 42: 486−491.

[9] 黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 不同耕作方式对旱作区冬小麦生产和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 50–54. [Huang Ming, Wu Jinzhi, Li Youjun, et al. Effects of different tillage management on production and yield of winter wheat in dryland[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 50–54.]

[10] 谢瑞芝, 李少昆, 李小君, 等. 中国保护性耕作研究分析——保护性耕作与作物生产[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1914–1924. [Xie Ruizhi, Li Shaokun, Li Xiaojun, et al. The analysis of conservation tillage in China—Conservation tillage and crop production: Reviewing the evidence[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 1914–1924.]

[11] 郁鑫, 王旭东. 黄土高原不同耕作方式对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(5): 144–146, 156. [Yu Xin, Wang Xudong. Effects of different tillage methods on soil physical-chemical properties and crop yield in Loess Plateau[J]. Anhui Agricultural Science, 2018, 46(5): 144–146, 156.]

[12] 韩宾, 李增嘉, 王芸, 等. 土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 48–53. [Han Bin, Li Zengjia, Wang Yun, et al. Effects of soil tillage and returning straw to soil on wheat growth status and yield[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 48–53.]

[13] 袁建钰, 李广, 闫丽娟, 等. 黄土高原不同灌水量下春小麦土壤与植物碳氮磷含量及其化学计量比特征[J]. 草业科学, 2020, 37(9): 1803–1812. [Yuan Jianyu, Li Guang, Yan Lijuan, et al. Soil and plant carbon, nitrogen, and phosphorus content and their stoichiometry in spring wheat under different irrigation treatments in the Loess Plateau[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(9): 1803–1812.]

[14] 王嘉男, 李玲玲, 谢军红, 等. 半干旱区保护性耕作对旱作春小麦光合特性和产量形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(12): 1493–1500. [Wang Jianan, Li Lingling, Xie Junhong, et al. Effects of conservation tillage on photosynthesis and yield formation of rain-fed spring wheat in semi-arid areas[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(12): 1493–1500.]

[15] Böhm W. Methods of Studying Root System[M]. Berlin: Springer Verlag, 1979.

[16] 王艳哲, 刘秀位, 孙宏勇, 等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 282–289. [Wang Yanzhe, Liu Xiuwei, Sun Hongyong, et al. Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 282–289.]

[17] 罗珠珠, 黄高宝, 张国盛. 保护性耕作对黄土高原旱地表土容重和水分入渗的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 7–11. [Luo Zhuzhu, Huang Gaobao, Zhang Guosheng. Effects of conservation tillage on bulk density and water infiltration of surface soil in semi-arid area of west Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(4): 7–11.]

[18] 王志鑫, 孙敏, 任爱霞, 等. 施氮量对干旱年探墒沟播旱地小麦土壤水分利用和产量的影响[J].生态学杂志, 2021, 40(11): 3598–3607. [Wang Zhixin, Sun Min, Ren Aixia, et al. Effects of nitrogen application rate on soil water use and yield of dryland wheat under furrow sowing in drought year[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(11): 3598–3607.]

[19] 王碧胜, 蔡典雄, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量及水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1455–1464. [Wang Bisheng, Cai Dianxiong, Wu Xueping, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil organic carbon,maize yield and water utilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1455–1464.]

[20] 郭清毅, 黄高宝. 保护性耕作对旱地麦–豆双序列轮作农田土壤水分及利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 165–169. [Guo Qingyi, Huang Gaobao. Conservation tillage effects on soil moisture and water use efficiency of two phases rotation system with spring wheat and field pea in dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 165–169.]

[21] 冯福学, 黄高宝, 于爱忠, 等. 不同保护性耕作措施对武威绿洲灌区冬小麦水分利用的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1060–1065. [Feng Fuxue, Huang Gaobao, Yu Aizhong, et al. Influence of different conservation tillage measures on the water utilization of winter wheat in Wuwei oasis irrigation area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(5): 1060–1065.]

[22] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦–夏玉米轮作系统中干物质生产和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(10): 1797–1807. [Zhao Yali, Guo Haibin, Xue Zhiwei, et al. Effects of tillage and straw returning on biomass and water use efficiency in a winter wheat and summer maize rotation system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(10): 1797–1807.]

[23] 冯福学, 黄高宝, 柴强, 等. 不同耕作措施对冬小麦根系时空分布和产量的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2499–2506. [Feng Fuxue, Huang Gaobao, Chai Qiang, et al. Effects of different tillage on spatiotemporal distribution of winter wheat root and yield[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2499–2506.]

[24] 王健波, 严昌荣, 刘恩科, 等. 长期免耕覆盖对旱地冬小麦旗叶光合特性及干物质积累与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 296–305. [Wang Jianbo, Yan Changrong, Liu Enke, et al. Effects of long-term no-tillage with straw mulch on photosynthetic characteristics of flag leaues and dry matter accumulation and translocation of winter wheat in dryland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 296–305.]

[25] 陈乐梅, 马林, 刘建喜, 等. 免耕覆盖对春小麦灌浆期干物质积累特性及最终产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 21–24. [Chen Lemei, Ma Lin, Liu Jianxi, et al. The effect of no-tillage with stubble on the dynamic change of dry matter accumulation and yield of spring wheat during grain filling[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(6): 21–24.]

[26] 郭星宇, 王浩, 于琦, 等. 耕作对渭北旱塬小麦–玉米轮作田土壤水分和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 2977–2990. [Guo Xingyu, Wang Hao, Yu Qi, et al. Effect of tillage on soil moisture and yield in Weibei wheat-corn rotation fields[J].Chinese Agricultural Science, 2021, 54(14): 2977–2990.]

[27] 马林, 刘建喜, 陈乐梅, 等. 不同耕作方式对春小麦花后叶面积及产量影响[J]. 新疆农业大学学报, 2008, 31(2): 22-24. [Ma Lin, Liu Jianxi, Chen Lemei, et al. Effect of different tillage on the dynamic change of leaf area after anthesis and yield of spring wheat[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2008, 31(2): 22-24.]

[28] 陈远学, 李汉邯, 周涛, 等. 施磷对间套作玉米叶面积指数、干物质积累分配及磷肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2799-2806. [Chen Yuanxue, Li Hanhan, Zhou Tao, et al. Effects of phosphorus fertilization on leaf area index, biomass accumulation and allocation, and phosphorus use efficiency of intercropped maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 2799-2806.]

[29] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2326-2332. [Li Lingling, Huang Gaobao, Zhang Renzhi, et al. Effects of different conservation tillage practices on soil moisture in dry farmland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9): 2326-2332.]

[30] 周宝元, 王新兵, 王志敏, 等. 不同耕作方式下缓释肥对夏玉米产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 821-829. [Zhou Baoyuan, Wang Xinbing, Wang Zhimin, et al. Effect of slow-release fertilizer and tillage practice on grain yield and nitrogen efficiency of summer maize (*Z. mays* L.) [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(3): 821-829.]

Effects of conservation tillage on the water storage, moisture conservation, and yield of dry-land wheat fields of central Gansu Province

QI Xiaoping, LI Guang, YUAN Jianyu, CHANG Haigang

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The aim of this study was to explore the effects of conservation tillage on water storage, moisture conservation, and yield in dry-land wheat fields in the Loess Plateau of central Gansu province. Based on field experiments for five consecutive years, the effects of different tillage measures [traditional tillage (T), straw mulching (TS), no tillage (NT), and no tillage with straw mulching (NTS)] on the moisture-storage rate in the leisure period, water-use efficiency, dry matter accumulation and transport, yield, and agronomic characteristics of spring wheat in a farming cycle from August 2019 to August 2020 were analyzed. The results were as follows. (1) Compared with treatment T, the NTS treatment increased the soil bulk-density and water content in the plow layer, increased the soil water storage during the sowing and harvest periods in a dry-land wheat field, increased the water-use efficiency by 48.18%, and increased the moisture-storage rate in the leisure period by 5.70%. (2) The NTS treatment significantly increased the leaf area index and delayed the leaf senescence of spring wheat. Compared with the TS and NT treatments, the dry matter accumulation after anthesis under the NTS treatment increased by 67.38% and 32.14%, respectively, whereas the contribution rate of the dry matter after anthesis increased by 12.47% and 6.61%, respectively. (3) The NTS treatment optimized the yield components and significantly increased the yield of spring wheat to 3243.30 $kg\cdot hm^{-2}$, which was 49.32% higher than the yield of traditional tillage (T). In addition, the NTS treatment improved the population structure of spring wheat, as well as significantly increasing its root dry-weight, plant height, and biomass, while reducing its root-shoot ratio. Correlation analysis showed that the increased water-use efficiency, leaf area index, and root dry-weight were important factors in the increase of wheat yield. In conclusion, under the conditions of this experiment, NTS mulching was the optimal tillage treatment in terms of saving water and increasing the yield of dry-land wheat fields in the Loess Plateau of central Gansu province. Thus, it may be worthwhile popularizing and applying the treatment in this area.

Keywords: Loess Plateau in central Gansu Province; dry-land wheat fields; conservation tillage; spring wheat; water use efficiency; yield; dry matter accumulation and transportation